

# Técnicas de levantamiento fotogramétrico de estructuras antiguas. Ejemplo de las murallas de Barcelona y de Alepo

Felipe Buill Pozuelo

Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. UPC

felipe.buill@upc.edu

## Introducción

De las diferentes técnicas que podemos emplear en los levantamientos de estructuras antiguas la topografía y la fotogrametría pueden alcanzar, de modo eficaz y poco costoso, los objetivos de representación gráfica que se plantean.

La topografía ha sido la técnica más utilizada en los levantamientos arquitectónicos y arqueológicos de mediana y gran extensión, utilizándose las medidas directas para elementos de pequeña envergadura.

El uso de la fotogrametría ha sido más restringido; sin embargo, el empleo de las técnicas fotogramétricas abre paso a un sinfín de utilidades y desarrollos posibles en el ámbito de la documentación gráfica, de las bases de datos, de la divulgación, de producciones multimedia, etc. Conviene recordar que la fotogrametría está recomendada por la UNESCO para la catalogación de monumentos y sitios.

La fotogrametría (Photos Gramma Metron) es una técnica que estudia y define con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando medidas hechas sobre una o varias fotografías (Bonneval, 1972).

Las principales aplicaciones se encuentran en la cartografía y en el levantamiento de planos (tanto en aplicaciones topográficas como no topográficas). En el caso de la fotogrametría terrestre se utiliza en aplicaciones en:

- Arquitectura y arqueología.
- Deformación de estructuras (presas, puentes, edificios...).
- Criminología.
- Medicina y cirugía, etc.

## Reseña histórica

Aunque a primera vista podría parecernos que la fotogrametría es una técnica reciente, al menos igual de reciente que la fotografía, existen antecedentes que demuestran que esto no es así, puesto que hay testimonios del uso de perspectivas dibujadas empleadas para levantamientos de planos en los siglos XVII-XVIII. Incluso podríamos hablar de unos hechos aún anteriores, como podría ser la utilización de la llamada cámara oscura en el siglo XVI. Los artistas del

Renacimiento aportaron, por ejemplo, la definición de las reglas de la perspectiva artificial como método para reconstruir las tres dimensiones en soportes objetivamente bidimensionales; entre estos encontramos a Leone Battista Alberti (1404-1472), Piero della Francesca (1415-1492), Leonardo da Vinci (1452-1519) y Alberto Durero (1471-1528).

Se conservan algunos grabados de Durero en los que muestra como se podían obtener perspectivas dibujadas a partir de la definición de un punto de vista, un bastidor que define el plano del cuadro y diversos sistemas de medida de las coordenadas fotográficas sobre este marco al observar un modelo.

Desde mediados del siglo XIX se sustituyeron estas perspectivas dibujadas con cámara clara por fotografías, al presentar éstas mayor información de una manera más rápida y precisa.

En la actualidad las fotografías digitales permiten obtener información de muy alta calidad del elemento fotografiado. Estas imágenes son utilizadas en el proceso fotogramétrico, obteniendo como resultado modelos numéricos del terreno, cartografía vectorial y diversos productos derivados de la fotografía con calidad métrica.

82

## Instrumental y metodología

Existe una gran variedad de instrumental de campo para la captura de datos espaciales, tanto de instrumentos topográficos como fotogramétricos. Entre estos se encuentran:

- Estaciones totales.
- Láser escáner terrestre.
- Cámaras fotográficas métricas y semimétricas.
- Digitalizadores ópticos.

Los instrumentos de restitución fotogramétrica empleados en gabinete han evolucionado hacia sistemas numéricos, permitiendo un manejo más cómodo y la obtención de productos derivados de gran calidad (cartografía vectorial 3D, MDT, ortofotografías ...).

Una vez realizadas las fotografías y los trabajos topográficos de apoyo en campo, existen diferentes métodos de trabajo que dan lugar a diversas formas de representación (Buill *et al.*, 2007). Cabe destacar los siguientes:



**Figura 1.** Fachada rectificada de la Parroquia de Sant Baldiri. Sant Boi de Llobregat, Barcelona. Fotografía: Martínez, J.; Reche, E. y Buill, F.

- Rectificación fotográfica.
- Ortofotografía.
- Levantamientos gráficos obtenidos directamente por restitución estereofotogramétrica.
- Fotogrametría numérica.

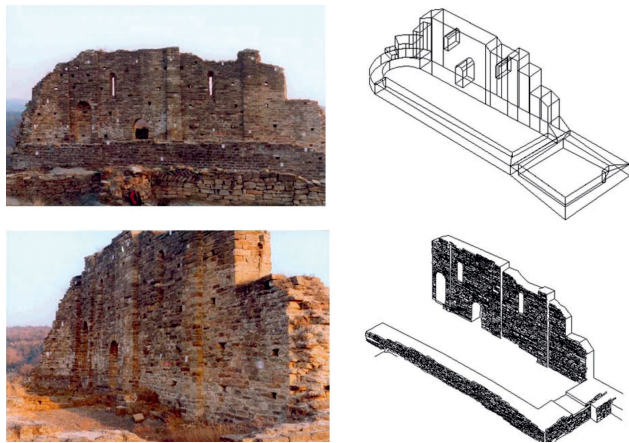
En multitud de ocasiones los levantamientos tienen como objetivo paramentos simples cuyos elementos se encuentran situados sobre superficies planas. En este caso es posible utilizar el método fotogramétrico más sencillo para la obtención de planos, la rectificación fotográfica.

La rectificación es el proceso que consigue transformar o enderezar una perspectiva fotográfica obteniendo una representación semejante a la que se conseguiría en la fotografía estrictamente perpendicular al plano (Martínez *et al.*, 2001) (fig. 1). La limitación más importante de la rectificación es la falta de planitud del elemento a rectificar.

En la actualidad el resultado final es una fotografía digital corregida y presentada a una escala o resolución conocida, sin embargo se puede extraer información vectorial de los elementos de interés del alzado sin necesidad de reconstruir la imagen, como en el caso de trabajar con algunos programas de diseño (por ejemplo AutoCAD).

Las principales ventajas de la rectificación digital son:

- Tiene gran riqueza de detalles si se compara con representaciones vectoriales (plano convencional).



**Figura 2.** Levantamiento mediante rectificación y topografía de l'Esquerda. Río Ter, Masies de Roda, Barcelona. Fotografía: Bau, F.; Masdeu, F., y Buill, F.

- Tiene la posibilidad de presentar información de color, de textura, etc.
- Permite trabajar con los distintos canales que forman la imagen (RGB, gris).
- Permite correcciones geométricas y radiométricas.

Además la rectificación digital se puede efectuar de una sola fotografía o de un conjunto de fotografías, de una fachada o de un conjunto, por lo que en ocasiones es interesante formar un plano en formato ráster con el mosaico de todas ellas. Además, las imágenes pueden ser tratadas radiométricamente mostrando finalmente un documento de mayor calidad.

Este tipo de levantamiento puede ser completado con información topográfica, permitiendo la creación de conjuntos espaciales a partir de la rectificación encadenada (Bau *et al.*, 1999) (fig. 2).

Otro método fotogramétrico con base fotográfica final es la ortofotografía. Este documento cartográfico se obtiene a partir de la ortoproyección de las fotografías efectuadas de un modelo 3D.

La ortoproyección consiste en la rectificación diferencial de la superficie del modelo y su posterior teselado. De esta manera se puede construir un documento con apariencia fotográfica a escala uniforme de cualquier superficie, es decir, obtener un plano o mapa.

Este tipo de representación permite resolver los problemas ocasionados por las deformaciones del sensor y de la lente (distorsión), la inclinación del



**Figura 3.** Levantamiento fotogramétrico de la casa Milà, «La Pedrera», Barcelona. Fotografía: Muñoz, F. J., y Buill, F.

eje de la fotografía y, a diferencia de la rectificación, el relieve (falta de planeidad del terreno o modelo).

Las principales características que aporta la ortofotografía son la gran cantidad de información que se puede extraer de este documento, la alta precisión métrica conseguida y la rapidez en su ejecución.

En cuanto a los levantamientos gráficos tridimensionales obtenidos directamente por restitución vectorial, el método más utilizado sigue siendo la estereofotogrametría, consiguiendo información espacial a partir de la información bidimensional extraída de dos fotografías con recubrimiento estereoscópico. Este método puede ser empleado tanto en el caso aéreo para cartografía, como en el caso terrestre, utilizando un proceso similar en la toma de los datos y en su restitución (Muñoz, y Buill, 1997) (fig. 3).

Otra forma de captura de información espacial son los llamados digitalizadores ópticos 3D, que funcionan a partir de la proyección de luz estructurada o por barrido lateral de un láser sobre el objeto de trabajo. Estos digitalizadores se basan en la obtención de coordenadas espaciales, a partir de la intersección producida por el rayo de luz proyectado y una cámara que captura la imagen donde aparece el punto proyectado en el barrido sobre el modelo.

De forma análoga al caso anterior se están empleando, cada vez más, los sistemas de captura masiva de datos 3D sin contacto, mediante la medida de distancias junto con el sistema de barrido que





**Figura 4.** Cobertura fotográfica de lateral de torre, Barcelona. Fotografía: Buill, F.

permite el desplazamiento transversal. Además, existe la posibilidad de utilizar la reflectividad del láser devuelta por el objeto como canal de información, que junto con el color que se extrae de las fotografías digitales efectuadas se pueden asignar a cada punto medido. De esta manera se genera una base de datos donde aparece toda esta información

84



**Figura 5.** Detalle de paño de muralla romana (ortofotografía), Barcelona. Fotografía: Buill, F.



**Figura 6.** Láser escáner, interior de la torre baluarte. Aleppo, Siria. Fotografía: Buill, F.; Regot, J.; Mesa, A., y Núñez, M. A.

(XYZIRGB) que puede facilitar el estudio del material, la textura...

## Casos de estudio. La muralla romana de Barcelona

En este primer ejemplo, se muestran los trabajos desarrollados en un antiguo palacio situado en la calle Lledó en Barcelona, donde se ocultaban algunos paños de la antigua muralla romana del siglo IV. El levantamiento engloba una torre y diferentes estancias a nivel de suelo, así como diferentes paños en diferentes alturas.

La primera labor realizada consistió en la construcción de una red de bases de apoyo topográfico en un mismo sistema coordinado que permitiera georreferenciar todas las fachadas del levantamiento.





**Figura 7.** Cobertura fotográfica del paño lateral de torre baluarte. Aleppo, Siria. Fotografía: Buill, F.; Regot, J.; Mesa, A., y Núñez, M. A.

En este caso se ubicaron a diferentes alturas (patio, bajos y cuatro alturas).

Seguidamente se efectuaron las coberturas fotográficas con diferentes modelos de cámaras fotográficas, con resoluciones comprendidas entre 6 y 12 Mpíxel y diferentes focales. Todas ellas calibradas para poder corregir la distorsión.

Se efectuaron reportajes fotográficos repetidos y en diferentes espacios temporales al ir descubriéndose y limpiándose los diferentes paños. Donde fue posible se efectuaron las fotografías siguiendo el criterio de pasada longitudinal y solape transversal en el caso de grandes alturas (con recubrimientos del 70% y 30% respectivamente) (fig. 4).

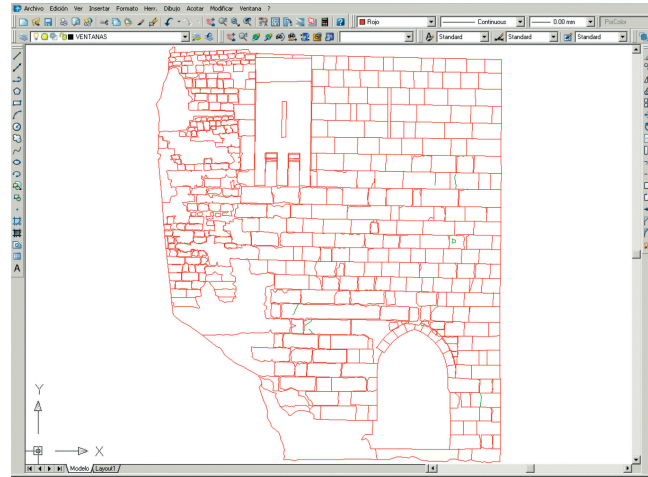
Para los paños que no presentaban profundidades distintas (en un rango inferior a 2 cm) se utilizó la rectificación fotográfica.

Para todas las fachadas se utilizó también la ortofotografía, lo que permitió mosaicar y completar todos los alzados (fig. 5). En estos mosaicos se corrigieron los diferentes cambios de luz y contraste encontrados.

Con esta información y la obtenida por restitución de los pares se construyeron los diferentes alzados vectoriales.

### Bab Antakya. Muralla de Aleppo (Siria)

El segundo caso corresponde al levantamiento de la puerta de entrada a la ciudad de Aleppo y las dos torres baluartes hexagonales, que permiten la entrada



**Figura 8.** Restitución de lateral de torre baluarte. Aleppo, Siria. Fotografía: Buill, F.

al zoco de la ciudad antigua. Este conjunto se encuentra emplazado en este lugar desde hace 4.000 años, conservando en la parte baja la construcción del siglo XIII. A continuación de estas torres se encuentra la muralla construida como defensa por los franceses.

Los trabajos topográficos y fotogramétricos de campo se tuvieron que realizar en un corto intervalo de tiempo (4 días) y de forma paralela. Además, se trabajó de forma redundante para garantizar los resultados.

En el caso de la topografía, se colocaron y tomaron para su georreferenciación diversas dianas en los paramentos de la muralla. Además se levantó tanto el interior como el exterior mediante un láser-escáner terrestre Riegl, modelo LMS-Z420i que



**Figura 9.** Imagen fotográfica versus imagen intensidad de torre baluarte. Aleppo, Siria. Fotografía: Buill, F.; Regot, J.; Mesa, A., y Núñez, M. A.



**Figura 10.** Imagen de puntos con color de las torres baluartes. Alepo, Siria. Fotografía: Buill, F.; Regot, J.; Mesa, A., y Núñez, M. A.

permitió, con posterioridad, la obtención de plantas, alzados y secciones (fig. 6).

Para los trabajos fotogramétricos fue necesario efectuar un reportaje fotográfico del interior y exterior de las torres, el exterior de la muralla y el paso al interior del zoco. Éste se realizó con una cámara analógica semimétrica (modelo Rollei 6006) con un total de 105 positivos digitalizados para trabajar con ellos mediante una estación fotogramétrica digital. Además, se tomaron más de doscientas imágenes con cámaras digitales estándar. Estas fotografías fueron tomadas con la finalidad de aportar información en aquellos casos en los cuales no fuera suficiente la información que facilitan las imágenes analógicas semimétricas (fig. 7).

Con estos datos fue posible la orientación y posterior restitución vectorial de todo el bloque fotográfico (fig. 8). Además se creó el modelo tridimensional capturado con el escáner y se pudieron producir

diferentes cartografías (planos de planta, alzados, secciones, imágenes de color, con reflectividad...).

La reflectividad del láser resultó muy útil a la hora de interpretar algunos paños que por motivos de desgaste de la piedra, color homogéneo o iluminación escasa presentaban una insuficiente calidad (fig. 9).

Además de la información de la reflectividad asociada a los puntos obtenidos con el láser escáner se puede asociar otro tipo de información como es el color extraído de fotografías digitales, la distancia al objeto,... (fig. 10).

## Bibliografía

BONNEVAL, H. (1972): *Photogrammétrie Générale*. París: Ed. Eyrolles.

BAU, F.; MASDEU, F., Y BULL, F. (1999): *Aixecament a gran escala del jaciment arqueològic de l'Esquerda*. Barcelona: EPSEB-UPC.

BULL, F.; NÚÑEZ, M.<sup>a</sup> A., Y RODRÍGUEZ, J. J. (2007): *Fotogrametria Arquitectonica*. Barcelona: Ediciones Upc. ISBN: 8483019205.

MARTÍNEZ, J.; RECHE, E., Y BULL, F. (2001): *Modelo tridimensional de la Església parroquial de Sant Baldiri*. Barcelona: EPSEB-UPC.

MUÑOZ, F. J., Y BULL, F. (1997): *Levantamiento fotogramétrico de la Pedrera*. Barcelona: EPSEB-UPC.